

Структура целевой функции и ограничений позволяют без численного дифференцирования вычислять их градиенты. Это дает возможность применить при решении эффективный метод оптимизации.

Численный пример показывает большие резервы снижения веса роторов за счет уменьшения толщины ступицы, днища, крышки и торцов обечайки. В дальнейшем предполагается учесть несимметричную природу нагружения, ее случайный характер и реальные конструктивные ограничения.

**Список литературы:** 1. Лукьяненко В.М., Таранец А.В. Промышленные центрифуги. – М.: Химия, 1974. – 376 с. 2. Богомалов С.И., Жовдак В.А., Иглин С.П. Весовая оптимизация роторов центрифуг с учетом случайного нагружения // Динамика и прочность тяжелых машин. – Вып. 4. – Днепропетровск, 1979. – С. 127-131. 3. Иглин С.П. Весовая оптимизация осесимметричных оболочек при ограничении на перемещения // Динамика и прочность машин. – Вып. 41. – Харьков, 1985. – С. 93-99. 4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 318 с. 5. Harscher P., Amari S., Vahldieck R. etc. Analytical gradient evaluation of cost functions in general field solvers // A novel approach for optimization of microwave structures. IEEE Microwave Theory and Techniques Symposium MTT-S, Boston, June 2000. 6. Симсон Э.А., Назаренко С.А., Зюзин А.Ю., Любецкая В.Б. Анализ чувствительности при комбинированном статико-динамическом нагружении конструкций // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – № 12. – Харьков, 2003. – С. 125-129. 7. Иглин С.П. Оптимизация формы осесимметричных конструкций по прочностным и динамическим критериям // Складні системи і процеси. – № 2. – Запоріжжя, 2002. – С. 67-77. 8. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. – М.: Мир, 1986. – 352+320 с.

*Поступила в редколлегию 05.03.2008.*

УДК 539.3

**С.Н.ИСАКОВ**, канд.техн.наук; **О.В.КЕДРОВСКАЯ**; НТУ «ХПИ»

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВИБРАЦИОННЫХ ГИРОСКОПОВ**

Вібраційні гіроскопи (ВГ) є типовими представниками так званих структурно зв'язаних систем. У роботі розглядається скінчено-елементна модель ВГ, що дозволяє на базі методу аналізу чутливості оцінити вплив погіршеності виготовлення на робочі характеристики гіроскопа. Приведені результати тестових розрахунків.

Vibrations gyroscopes (VG) are the typical representatives of the so-called structurally intertwined systems. The finite-element model of VG, allowing on the base of sensitivity-analysis method to estimate influence of making error on performance of gyroscope, is examined in work. The results of tests calculations are represented.

**Введение.** Сегодня большой интерес, в том числе и с коммерческой точки зрения, представляют интегрированные навигационные системы (ИНС), которые представляют собой новый класс навигационного оборудования. Одним из интереснейших направлений разработки элементов ИНС на базе технологии микро-электромеханических систем (МЭМС) являются микродвигатели и микроколебательные системы -акселерометры и гироскопы, которые по своей сути являются типичными представителями так называемых структурно связанных систем (ССС).

Микроколебательные системы – вибрационные гироскопы (ВГ), основанные на гироскопическом эффекте, имеют широкие перспективы применения в ИНС [1] и обеспечивают высокую точность и непрерывность навигационных определений

параметров движения.

**Проектирование микросистем.** Специфические характеристики и различия между проектированием, производством и применением микросистем по сравнению с традиционными (макро) реализациями вытекают из их размеров.

Проектирование микросистем можно охарактеризовать несколькими положениями:

- 1 Для изготовления микросистем главным образом используется групповая технология;
- 2 Часто используемые материалы: кремний, металлы (никель, золото, медь, алюминий), керамика ( $Al_2O_3$ ,  $AlN$ ) и синтетика (полиимид, полиметил-метакрилат). При этом кремний имеет выдающиеся механические характеристики в микродиапазоне;
- 3 Так как микросистемы имеют малые размеры, следовательно, материальные издержки малы, а это означает, что производственные затраты низкие;
- 4 Стоимость производственной базы высокая;
- 5 Микросистемы экономически выгодно производить только в больших объемах;
- 6 Микросистемная технология непригодна для производства опытных образцов;
- 7 Кроме высокой стоимости производства опытного образца для выполнения производственного цикла требуется очень большое количество времени;
- 8 Проектирование включает в себя высокую ценовую ответственность за каждый следующий шаг в жизненном цикле изделия.

Высокая стоимость опытного образца для микросистем требуют активного применения обширных инструментальных средств моделирования для того, чтобы надежно предсказывать функционирование системы на более ранних этапах и оценивать погрешности изготовления элементов при групповом производстве.

### **Моделирование и динамический анализ вибрационных гироскопов.**

Конструктивной особенностью ВГ является то, что они содержат несколько подвижных механических систем, которые могут колебаться во взаимно перпендикулярных плоскостях [2]. Колебания в одной плоскости являются вынужденными, а наведенные колебания в другой плоскости появляются тогда, когда микрогироскоп поворачивается.

Схема ВГ представлена на рис. 1. Она содержит внутреннюю колебательную систему в форме диска 1 и внешнюю рамку-кольцо 2, которые соединены между собой и с корпусом 4 при помощи упругих торсионов 3. На поверхность внешнего кольца и внутреннего диска напылены электроды. При этом внутренний диск подключен к генератору гармонических колебаний, а в случае вращения системы внешнее кольцо будет совершать колебания, амплитуда которых является функцией угловой скорости и частоты колебаний, обработка которых производится специальным устройством обработки информации.

Для изготовления ВГ используются различные базовые технологии произ-

водства МЭМС, среди которых технология объемной микрообработки, поверхностной микрообработки, LIGA и SIGA технологии, а также MUMPs процесс.

Для эффективной работы ВГ необходимо обеспечить одинаковые собственной частоты колебаний внутренней системы и внешней рамки.

Наиболее эффективно моделирование ВГ осуществляется восьми и двадцати узловыми конечными элементами с четырьмя степенями свободы в узле, а поиск собственных значений и форм строится на основании подхода, описанного в [3].

Расчетная модель и результаты динамического анализа конструкции ВГ, изготовленного из кремния, приведены на рис. 2-5.

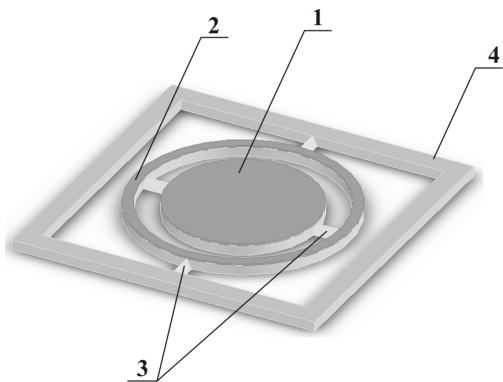


Рисунок 1

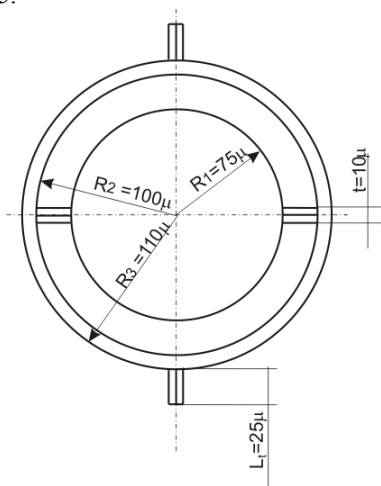


Рисунок 2

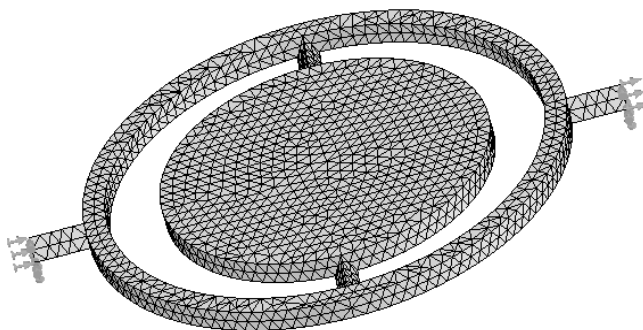


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель ВГ без электродов



Рисунок 4 – 2 форма колебаний ВГ без электродов

При этом учет в расчетной модели ВГ электродов, выполненных из сплава золота, на поверхности кремниевых элементов, является весьма важным, так как приводит к изменению расчетных значений собственных частот системы. Результаты зависимости собственной частоты ВГ от толщины электродов приведены в таблице.

Толщина электродов, микрон	Значение частоты (2 форма), Гц
-	2,0968e+005
0,5	1,8165e+005
1	1,6439e+005
1,5	1,5290e+005
2	1,4462e+005

**Анализ чувствительности.** По сравнению с традиционными технологиями проектирование микросистем имеет важнейшее значение из-за накладываемой на этот этап ценовой ответственности за последующие этапы, из-за высокой стоимости опытного образца и отсутствия возможности ремонта. Поэтому важная роль на этом этапе отводится анализу чувствительности, основная задача которого заключается в установлении соотношений между изменениями геометрических размеров конструкций и изменениями в их рабочих характеристиках.

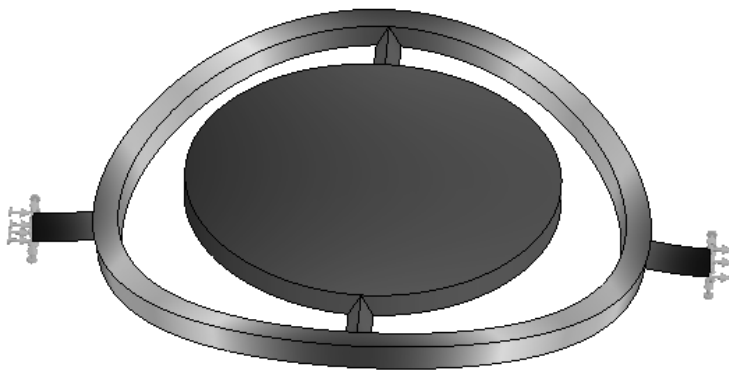


Рисунок 5 – Перемещения на 2-й форме

Полученные при этом данные могут быть использованы не только для создания эффективной конструкции ВГ, но и, что очень важно, при оценке несовершенств изготовления. Эти данные позволят определить наиболее чувствительные зоны конструкции, на которых необходимо сосредоточить максимальное внимание при разработке технологического процесса группового изготовления.

Особенность рабочих характеристик ВГ состоит в том, что они записываются в виде функционалов от резонирующей собственной формы, а специфика проведения анализа чувствительности базируется на методике разработанной в [3, 4] и дальнейшие исследования будут проводиться в этом направлении.

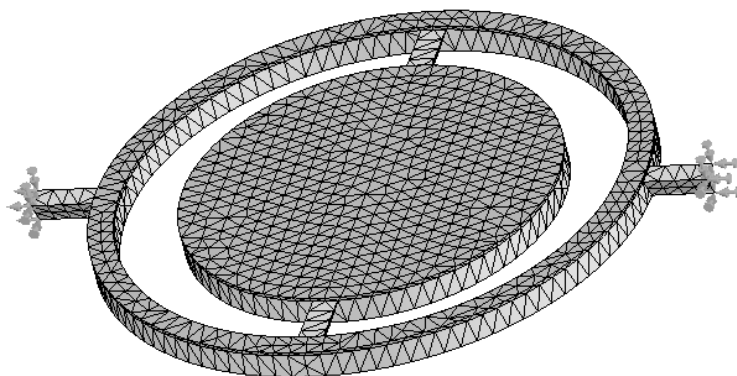


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель ВГ с электродами из золота



Рисунок 7 – 2 форма колебаний ВГ с электродами

**Список литературы** 1. Putty M., Najafi K. A micromachined vibrating ring gyroscope // Technical Digest, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head. – 1994, June. – P. 13-16. 2. An S., Oh Y.S., Park K.Y., Lee S.S., Song C.M. Dualaxis microgyroscope with closed loop detection // Sensors and Actuators. – 1999. – 73. – P. 1-6. 3. Simson E., Taranukha F. Shape optimization of large ultrasonic tools // Proc. 3rd Int. Conf. OPTT 93. – 1993. – P. 31-42. 4. Isakov S. Adaptive Structures Optimization // Modelling and Control of Adaptive Mechanical Structures - Fortschr. -Ber. VDI. – Reihe 11, Nr. 268. – Duesseldorf: VDI Verlag, 1998. – PP. 249-256.  
Поступила в редколлегию 11.06.2008.